

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Amgalanbayar Tsevelnyam



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

LOKALIZACE ZAŘÍZENÍ POMOCÍ BLE RÁMCŮ

DEVICE LOCALIZATION USING BLE PACKETS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Amgalanbayar Tsevelnyam

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Sysel, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Amgalanbayar Tsevelnyam

ID: 153309

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace zařízení pomocí BLE rámců

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prozkoumejte technologii vysílání rámců Bluetooth Low Energy. Stanovte jakým způsobem a za jakých podmínek je možné je využít pro lokalizaci mobilního zařízení. Porovnejte různé lokalizační algoritmy. Zaměřte se na vliv rušení a na přesnost lokalizace. Funkčnost základní lokalizace ověřte experimentálně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Bluetooth Core Specification 4.0. Bluetooth Special Interest Group. Dostupné na URL https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashc?doc_id=229737. [14.10.2014]

[2] Kammer, D.; McNutt, G.; Senese, B.; Bray, J. Bluetooth Application Developer's Guide. Syngres. ISBN 1-928994-42-3.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Petr Sysel, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá lokalizací objektů nebo osob uvnitř budovy tzv. indoor lokalizace pomocí Bluetooth Low Energy. Výstupem práce je zjištění přesnosti lokalizační metody Jedna nejbližší zóna na hustotě lokalizační sítě, implementace metody Trilaterace a zjištění přesnosti této metody na hustotě lokalizační sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lokalizace uvnitř budov, ISM, BLE, Přesnost, Hustota lokalizační sítě

ABSTRACT

Master's thesis is about indoor localization of objects or persons using Bluetooth Low Energy. The outcome of this work is determining the accuracy of a localization method One Nearest Zone on density of the localization network, implementing the Trilateration method and also determining the accuracy of this localization method on density of the localization network.

KEYWORDS

Indoor localization, ISM, BLE, Accuracy, Density of the localization network

TSEVELNYAM, Amgalanbayar *Lokalizace zařízení pomocí BLE rámců*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 57 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Sysel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Lokalizace zařízení pomocí BLE rámců“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Syslovi, Ph.D. konzultantovi panu Mgr. Michalu Holčíkovi a kolegům z práce za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také bych chtěl velice poděkovat své rodině za jejich podporu.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	11
1 Lokalizace	12
1.1 Lokalizační metody	12
1.1.1 Metody založené na měření intenzity přijímaného signálu . . .	12
1.1.2 Metody založené na měření doby šíření signálu	13
1.1.3 Metody založené na frekvenci událostí	13
1.2 Lokalizační technologie	13
1.2.1 Radar - Radio Detection And Ranging	13
1.2.2 Sonar - Sound Navigation And Ranging	14
1.2.3 GPS - Global Positioning System	14
1.2.4 Active Bat	14
1.2.5 GSM - Global System for Mobile Communications	14
1.2.6 RFID - Radio-frequency identification	14
1.2.7 Wi-Fi	15
2 ISM pásma	16
3 Bluetooth	18
3.1 Specifikace	18
3.2 Verze	18
3.3 Frekvenční pásmo	20
3.4 Topologie sítě	20
3.5 Modulace a zpracování signálu	22
3.6 Bluetooth Low Energy - BLE	24
3.6.1 BLE Oznamovací paket (Advertising packet)	25
4 Trilaterace	26
4.1 Případy, které mohou nastat nepřesným stanovením vzdáleností . . .	27
5 Lokalizace uvnitř budov pomocí Bluetooth Low Energy	32
5.1 Infrastruktura testované lokalizační sítě	32
5.2 Lokalizační server	34
5.3 Realizace měření	35
5.4 Metoda Jedna nejbližší zóna	37
5.4.1 Princip lokalizace	37
5.4.2 Ukázka lokalizace	38
5.4.3 Výsledky měření	39

5.5	Metoda Trilaterace	40
5.5.1	Princip lokalizace	40
5.5.2	Závislost mezi hodnotou RSSI a vzdáleností	41
5.5.3	Výsledky měření	42
5.6	Srovnání výsledků měření	43
	Závěr	44
	Literatura	45
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	48
	Seznam příloh	50
A	Hodnoty získané měřením	51
A.1	Změřené hodnoty přesnosti metody Jedna nejbližší zóna	51
A.2	Změřené hodnoty přesnosti metody Trilaterace	54
B	Obsah přiloženého CD	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Rozdělení světa na tři oblasti (převzato z [15]).	16
3.1	Typy struktur v topologii ad-hoc.	21
3.2	Typy sítě v systému Bluetooth.	21
3.3	Komunikace mezi jednotkami Master a Slave (převzato z [15]).	22
3.4	Pakety skládané z různých počtů timeslotu (převzato z [15]).	23
3.5	Paket přenášený v systému Bluetooth (inspirováno z [16]).	23
3.6	Bluetooth Low Energy kanály ve srovnání s Wi-Fi kanály (převzato z [24]).	24
3.7	BLE oznamovací paket (inspirováno z [24]).	25
4.1	Grafické znázornění principu metody trilaterace.	26
4.-2	Důsledky nepřesného stanovení vzdálenosti (převzato z [27]).	31
5.1	Infrastruktura lokalizační sítě.	32
5.2	Gigaset G-Tag - Bluetooth lokalizační čip.	33
5.3	Ukázka spuštění serveru přes příkazový řádek.	34
5.4	Přehled dostupných REST zdrojů lokalizačního serveru.	34
5.5	Lokalizační agent.	35
5.6	Lokalizační server a lokalizační agent při měření.	36
5.7	Rozmístění senzorů kdy vzdálenost mezi senzory byla 1 m.	36
5.8	Vývojový diagram metody Jedna nejbližší zóna.	37
5.9	Ukázka lokalizace pomocí metody Jedna nejbližší zóna.	38
5.10	Závislost chybovosti metody Jedna nejbližší zóna na hustotě lokalizační sítě.	39
5.11	Vývojový diagram metody Trilaterace.	40
5.12	Závislost hodnoty RSSI na vzdálenosti.	41
5.13	Závislost chybovosti metody Trilaterace na hustotě lokalizační sítě.	42
5.14	Závislost chybovosti dvou lokalizačních metod na hustotě lokalizační sítě.	43

SEZNAM TABULEK

2.1	ISM pásmo definované podle ITU-R (převzato z [9]).	17
3.1	Výkonnosti podle tříd (převzato z [12]).	18
3.2	Kmitočtové rozsahy podle států (převzato z [15]).	20
3.3	Dosah BLE podle výkonu (převzato z [21]).	24
5.1	Kvantily chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při různých hustotách lokalizační sítě	39
5.2	Naměřené hodnoty RSSI při různých vzdálenostech.	41
5.3	Kvantily chybovosti metody Trilaterace při různých hustotách lokalizační sítě	43
A.1	Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 100 cm mezi senzory.	51
A.2	Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 200 cm mezi senzory.	52
A.3	Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 300 cm mezi senzory.	53
A.4	Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 400 cm mezi senzory.	53
A.5	Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 100 cm mezi senzory.	54
A.6	Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 200 cm mezi senzory.	55
A.7	Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 300 cm mezi senzory.	56
A.8	Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 400 cm mezi senzory.	56

ÚVOD

Lokalizace se využívá v různých oblastech průmyslu (např.: lodní, letecký a automobilový průmysl). Existují různé technologie na venkovní lokalizaci (např.: radarová, sonární a GPS). Ale zjistilo se, že se tyto technologie nedají využít pro jinou lokalizaci než pro tu venkovní. V dnešní době se čím dál více dostává do středu zájmu lokalizace objektů nebo osob uvnitř budovy tzv. indoor lokalizace. Tento typ lokalizace se dá realizovat opět několika různými způsoby neboli technologiemi. Ale pro účely tohoto typu lokalizace jsem si vybral technologii Bluetooth Low Energy, jelikož tato technologie má nízkou pořizovací cenu, malé rozměry, je snadno přenášení schopná a jednoduše implementovatelná.

Diplomová práce se zabývá lokalizací uvnitř budov pomocí technologie BLE (Bluetooth Low Energy). V první kapitole je nejprve popsáno několik druhů lokalizace, v další kapitole rozložení ISM pásma a technologie Bluetooth. Pro účely lokalizace uvnitř budov byly implementovány dvě lokalizační metody (Jedna nejbližší zóna a Trilaterace), které jsou popsány v kapitolách 5.4 a 5.5.

Praktické měření přesnosti lokalizace na hustotě sítě probíhá v budově firmy IXPERTA s.r.o na adrese Bidláky 837/20 Brno-Štýřice 639 00. Ve svém měření se soustředím na přesnost dvou lokalizačních metod (Jedna nejbližší zóna a Trilaterace) na hustotě lokalizační sítě.

Poslední část práce je věnována vyhodnocení výsledků, které byly získány měřením v reálných prostředích.

1 LOKALIZACE

Lokalizace je určení nebo odhadnutí neznámé polohy objektů či osob. Pro zjednodušení bude v následujícím textu objekt či osoba s neznámou polohou označován jako neznámý objekt. V této kapitole budou stručně popsány používané lokalizační metody a technologie.

1.1 Lokalizační metody

1.1.1 Metody založené na měření intenzity přijímaného signálu

Metoda založená na blízkosti

Princip této metody spočívá v tom, že je senzor, který hlásí největší hodnotu intenzity přijímaného signálu (RSS - Received Signal Strength) od cíle neboli objektu s neznámou polohou, předpokládán jako nejbližší senzor k neznámému objektu, který chceme lokalizovat. Tato metoda matematicky nepočítá polohu neznámého objektu, místo toho vytváří oblasti kolem senzorů v lokalizovaném prostoru a předpokládá, že poloha neznámého objektu je v dané oblasti nejbližšího senzoru k tomuto neznámému objektu. Většinou se jako odhadovaná poloha neznámého objektu bere těžiště této oblasti neboli souřadnice nejbližšího senzoru.

Nevýhodou této metody je to, že je potřeba použít větší množství senzorů k tomu, abychom mohli dosáhnout vysoké přesnosti.

Metoda založená na rozsahu

Tato metoda na základě RSS hodnoty zjišťuje vzdálenost mezi senzorem a neznámým objektem. Poté vypočítává polohu neznámého objektu třeba pomocí trilaterace (viz [2]) nebo triangulace. Nevýhodou této metody je to, že je potřeba v každém lokalizovaném prostředí zjistit přibližný vztah mezi RSS hodnotou a vzdáleností, jelikož v každém prostředí jsou jiné faktory, které by mohly ovlivnit tento převod. Pokud se podaří dobře zkalibrovat převod mezi RSS hodnotou a vzdáleností v určitém prostředí, tak tato metoda má větší přesnost při menším počtu senzorů než předešlá metoda.

Metoda založená na otisku prstu

Metoda předpokládá, že existuje určitý vztah mezi RSS hodnotou a danou oblastí. Před nasazením této metody se v každé oblasti (tzn. v místě kolem každého senzoru) měří průměrná RSS hodnota, medián této hodnoty nebo histogram těchto

hodnot. Z těchto naměřených hodnot je pak vytvářena databáze u každé oblasti (tzn. u každého senzoru). Při zjišťování polohy neznámého objektu v lokalizovaném prostředí se srovnávají tyto naměřené hodnoty z databáze každého senzoru (tzv. otisky prstů) s hodnotami, které jsme získali od objektu, jehož polohu chceme určit. Potom se tímto způsobem najdou nejbližší 4 senzory a odhadovaná poloha neznámého objektu neboli cíle je střed těchto 4 bodů. Tato metoda je přesnější než předšlé dvě metody. Nevýhodou této metody je náročné zjištění charakteristických rysů nebo tzv. otisků prstů u každé oblasti v lokalizovaném prostředí.

1.1.2 Metody založené na měření doby šíření signálu

Tyto metody měří dobu, za kterou dorazí signál od vysílače k přijímači. Potom se na základě této hodnoty vypočítá vzdálenost mezi neznámým objektem a senzorem. Po zjištění 3 nejbližších senzorů se použije trilaterace k tomu, aby se vypočítala odhadovaná poloha neznámého objektu. Nevýhodou těchto metod je synchronizace času vysílače a přijímače. Pro více informací k těmto metodám viz [1].

1.1.3 Metody založené na frekvenci událostí

Technologie pro bezdrátový přenos dat používají různé typy protokolů. A součástí těchto protokolů bývá mechanismus, který má za úkol detekovat chyby během přenosu. Pomocí několika studií se zjistilo, že se zvyšující se vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem (neboli neznámým objektem a senzorem) se zvětšuje bitová chybovost (BER). To znamená, že se dá na základě hodnoty BER zjistit vzdálenost mezi senzorem a cílem, a poté se dá aplikovat třeba trilaterace k tomu, aby se vypočítala odhadovaná poloha neznámého objektu. Pro více informací viz [1].

1.2 Lokalizační technologie

1.2.1 Radar - Radio Detection And Ranging

Technologie Radar se používá v leteckém a v lodním průmyslu. Tato technologie používá rádiové vlny k lokalizaci. Senzor vyšle rádiovou vlnu, a poté čeká na vlnu, která se odrazí od neznámého objektu, tímhle způsobem se zjistí doba odezvy. Pomocí této doby odezvy se pak převodem určí vzdálenost mezi senzorem a neznámým objektem. Následně se vypočítá odhadovaná poloha cíle. Pro více informací k této technologii viz [3].

1.2.2 Sonar - Sound Navigation And Ranging

Sonar se používá k lokalizaci ponorek. Oproti technologii Radar používá ultrazvukové vlny k lokalizaci neznámých objektů, jelikož rádiové vlny mají pod vodou mnohem menší dosah než ty ultrazvukové. Jinak je tato technologie přibližně stejná k předešlé technologii. Pro více informací viz [4].

1.2.3 GPS - Global Positioning System

Tato technologie používá k lokalizaci neznámého objektu družice, které obíhají Zemi. Tyto družice neustále vysílají zprávy, které obsahují informace jako čas vyslání zpráv a souřadnice družic. Přijímač (neznámý objekt) na základě těchto informací zjistí dobu přenosu signálu. Díky této době se pak zjistí vzdálenost mezi přijímačem a satelitem. Poté se pomocí trilaterace určí odhadovaná poloha. Pro více informací viz [5].

1.2.4 Active Bat

Technologie je určena pro lokalizaci objektů či osob uvnitř budov (tzv. indoor lokalizace). Vysílač (objekt nebo osoba) bývá vybaven zařízením, které vysílá do prostoru ultrazvukové vlny. Přijímače (senzory) bývají většinou namontovány na stropě, senzory na základě přijímaných ultrazvukových vln zjišťují dobu trvání signálu od vysílače k přijímači. Poté se díky této hodnotě zjistí vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem. Nakonec se pomocí trilaterace určí poloha hledaného objektu či osoby.

1.2.5 GSM - Global System for Mobile Communications

Je to technologie především určená pro mobilní telekomunikaci. Ale díky tomu, že základnové stanice měří RSS hodnotu koncových mobilních telefonů, tak na základě této hodnoty se dá zjistit přibližná vzdálenost mezi základnovou stanicí a mobilním telefonem. Po zjištění alespoň nejbližších 3 základnových stanic se dá použít trilaterace k určení polohy neznámého objektu.

1.2.6 RFID - Radio-frequency identification

Tato technologie se využívá pro identifikaci zboží, pro identifikaci osob při přístupu do zabezpečených prostor a třeba při bezhotovostní platbě.

Existují dva druhy přijímačů:

- přijímače s pasivním čipem,
- přijímače s aktivním čipem.

Přijímače s pasivním čipem – používají intenzitu přijatého signálu k tomu, aby mohly odeslat odpověď vysílači. Tyto přijímače mají samozřejmě menší dosah.

Přijímače s aktivním čipem – mají vlastní zdroj napájení a disponují větším dosahem než ty pasivní. Při lokalizaci využívající RFID se vzdálenost mezi senzorem (RFID vysílačem) a neznámým objektem (RFID přijímačem) zjistí pomocí RSS hodnoty, která byla vyslána RFID přijímačem k RFID vysílači. Poté se dá aplikovat trilaterace k určení polohy neznámého objektu.

1.2.7 Wi-Fi

Je to technologie především určená pro bezdrátové internetové připojení. Pracuje stejně jako Bluetooth v ISM pásmu 2,4 GHz.

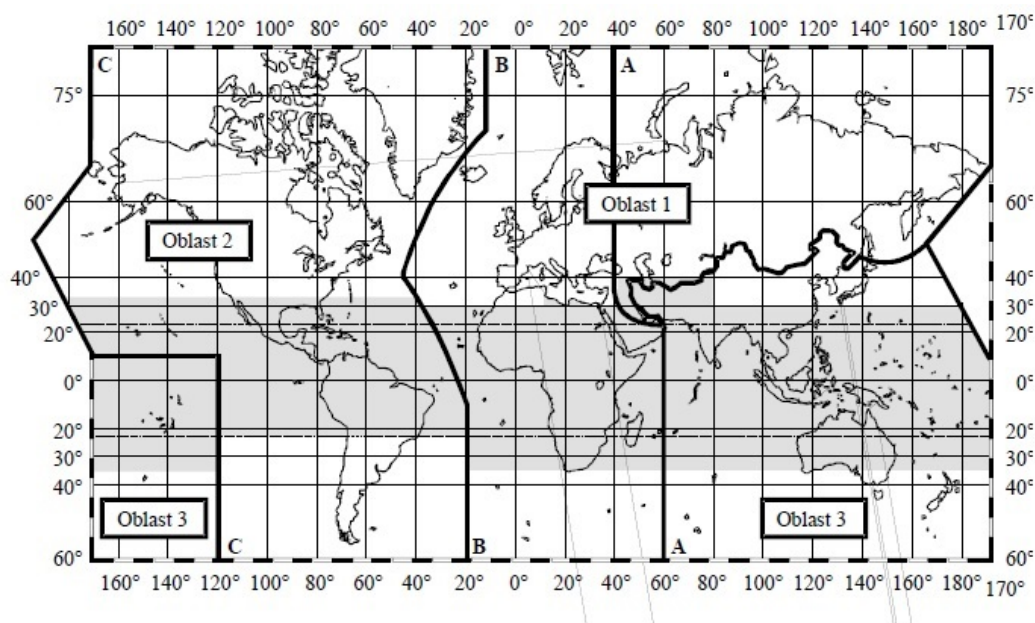
Tato technologie umožňuje změřit RSS hodnoty zařízení, která jsou ve Wi-Fi pásmu. Z toho vyplývá, že se pro lokalizaci pomocí této technologie dá využít jedna z metod, které byly stručně popsány výše. Viz sekce 1.1.1.

2 ISM PÁSMA

Pásma ISM (industrial, scientific and medical) jsou pásma, která byla přednostně určena pro průmyslové, vědecké a zdravotní účely, než komunikační. Pokud je v těchto pásmech použito schválené zařízení, provoz je bez licenčních poplatků, ale uživatel musí počítat s interferencemi mezi zařízeními, která využívají tato pásma.

Pásma jsou definována Radiokomunikačním řádem¹. Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) rozděluje využití těchto pásem do tří oblastí [10]:

- Oblast 1 – Evropa, Afrika, Blízký východ na západ od Perského zálivu včetně Iráku, bývalý Sovětský svaz a Mongolsko,
- Oblast 2 – Amerika, Grónsko a některé východní tichomořské ostrovy,
- Oblast 3 – asijské státy kromě států bývalého Sovětského svazu, Iránu a Oceánie.



Obr. 2.1: Rozdělení světa na tři oblasti (převzato z [15]).

¹Radio Regulations, International Telecommunication Union, Geneva, 2012 - dostupný z URL: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>

Rozsahy těchto pásem jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: ISM pásmo definované podle ITU-R (převzato z [9]).

Frekvenční rozsah	Šířka pásma	Střední frekvence	Dostupnost
6,765 – 6,795 MHz	30 kHz	6,780 MHz	nutnost povolení
13,553 – 13,567 MHz	14 kHz	13,560 MHz	celosvětově
26,957 – 27,283 MHz	326 kHz	27,120 MHz	celosvětově
40,660 – 40,700 MHz	40 kHz	40,680 MHz	celosvětově
433,050 – 434,790 MHz	1,74 MHz	433,920 MHz	Oblast 1
902,000 – 928,000 MHz	26 MHz	915,000 MHz	Oblast 2
2,400 – 2,500 GHz	100 MHz	2,450 GHz	celosvětově
5,725 – 5,875 GHz	150 MHz	5,800 GHz	celosvětově
24,000 – 24,250 GHz	250 MHz	24,125 GHz	celosvětově
61,000 – 61,500 GHz	500 MHz	61,250 GHz	nutnost povolení
122,000 – 123,000 GHz	1 GHz	122,500 GHz	nutnost povolení
244,000 – 246,000 GHz	2 GHz	245,000 GHz	nutnost povolení

Tato pásma používají technologie jako například Wi-Fi (IEEE Standard 802.11), Bluetooth (IEEE Standard 802.15.1) atd.

3 BLUETOOTH

Bluetooth slouží pro bezdrátový přenos signálu na kratší vzdálenosti. Propojuje dvě a více zařízení např. PC, PDA, mobilní telefon, klávesnice, myš, sluchátka atd. Tento systém byl představen poprvé v roce 1994 švédskou firmou Ericsson jako náhrada za sériové rozhraní RS-232.

Technologii Bluetooth nazvali po dánském králi Haraldu Bluetooth (česky Harald Modrozub, dánsky Harald Blåtand), který vládl v 10. století (911–986).

3.1 Specifikace

Bluetooth patří do kategorie WPAN (Wireless Personal Area Network) a je definován standardem IEEE 802.15.1. Bluetooth je založen na modulaci FHSS. Využívá kmitočtové ISM pásmo 2,4 až 2,4835 GHz.

Přístroje se dělí podle výkonosti do tří skupin (viz tab. 3.1).

Tab. 3.1: Výkonnosti podle tříd (převzato z [12]).

Třída	Maximální povolený výkon		Dosah
	mW	dBm	m
1	100	20	cca 100
2	2,5	4	cca 10
3	1	0	cca 1
4	0,5	-3	cca 0,5

Výhody systému Bluetooth:

- nízká pořizovací cena,
- nízký vysílaný výkon,
- snadná manipulace,
- bezpečnost,
- jednoduchá implementace.

3.2 Verze

Bluetooth 1.0 a 1.0a – vydány v červenci roku 1999. Byly to první verze Bluetoothu. Hlavním účelem bylo nahradit sériové kabely bezdrátovým spojením. Avšak tyto verze měly mnoho problémů s kompatibilitou.

Bluetooth 1.0b – vydáno v prosinci roku 1999. Byly přidány aktualizace na opravu chyb z předešlé verze.

Bluetooth 1.1 – vydáno v únoru roku 2001. V roce 2002 schválen jako IEEE Standard 802.15.1. Byl přidán indikátor síly signálu RSSI.

Bluetooth 1.2 – vydáno v listopadu roku 2003. Tato verze přinesla několik dalších vylepšení např.:

- Modulace AFH - zlepšuje odolnost vůči rádiovému rušení.
- Synchronní připojení eSCO - zlepšuje kvalitu hlasu.
- Vyšší přenosová rychlost - 721 kb/s.

Bluetooth 2.0+EDR – vydáno v listopadu roku 2004. Tato verze byla zaměřena na zlepšení propustnosti s využitím metody EDR (Enhanced Data Rate). Díky této metodě byla přenosová rychlost zvýšena na 2.1 Mb/s.

Bluetooth 2.1+EDR – vydáno v červenci roku 2007. Byla přidána funkce SSP (Secure Simple Pairing). Funkce SSP zjednodušuje spárování zařízení a zlepšuje bezpečnost.

Bluetooth 3.0+HS – vydáno v dubnu roku 2009. U této verze byla přenosová rychlost zvýšena na 24 Mb/s. Vysokorychlostní přenos je dosažen pomocí spojení přes standard Wi-fi (802.11).

Bluetooth 4.0 – vydáno v červnu roku 2010. Verze 4.0 nemá za úkol nahradit předešlou verzi. Hlavním směrem tohoto standardu je zajistit nízkou spotřebu energie (Low Energy).

Bluetooth 4.1 – vydáno v prosinci roku 2013. Důležitou vlastností specifikace je zlepšit odolnost vůči zvyšující se koexistenci technologie LTE.

Bluetooth 4.2 – vydáno v prosinci roku 2014. Tato verze přináší změny jako např.: zvýšení délky datového paketu, zabezpečená připojení atd. Pro více informací k této verzi viz [13].

Bluetooth 5 – vydáno 16-tého června 2016. Zlepšení, která přináší tato verze, se týkají především Internetu věcí (Internet of Things).

Pro více informací k verzím viz [12].

3.3 Frekvenční pásmo

Bluetooth využívá ISM pásmo 2,4 GHz. V Evropě se ISM pásmo pro technologii Bluetooth rozkládá mezi 2400 až 2483,5 MHz. Používá se 79 rádiových kanálů.

Ve Španělsku se toto pásmo rozkládá mezi 2445 až 2475 MHz a používá se zde 23 rádiových kanálů.

Rozdělení kmitočtového rozsahu je prováděno kvůli tomu, aby se snížila možnost vzájemného rušení s jinými technologiemi, které pracují v tomto pásmu např.: Wi-Fi, mikrovlnná trouba atd.

Rozdělení kmitočtového rozsahu podle státu můžete vidět v tab. 3.2

Tab. 3.2: Kmitočtové rozsahy podle států (převzato z [15]).

Stát	Kmit. rozsah [MHz]	Kmit. nosné [MHz]	Číslo kanálu
Evropa a USA	2400 – 2483,5	$f = 2402 + k$	$k=0 \dots 78$
Francie	2446,5 – 2483,5	$f = 2454 + k$	$k=0 \dots 22$
Španělsko	2445 – 2475	$f = 2449 + k$	$k=0 \dots 22$
Japonsko	2471 – 2497	$f = 2473 + k$	$k=0 \dots 22$

3.4 Topologie sítě

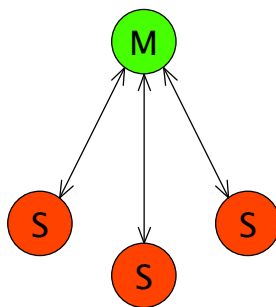
Technologie Bluetooth využívá topologii **ad-hoc**. Tato topologie vytváří strukturu point to point nebo point to multipoint (viz obr. 3.1). Bluetooth vytváří malé sítě nazývané piconet.

Piconet může mít maximálně 8 vzájemně komunikujících jednotek, konkrétně jeden nadřazený uzel (*Master*) a sedm podřazených uzlů (*Slave*) viz obr. 3.2a. Dalším typem sítě, který se vytváří v tomto systému, je scatternet.

Scatternet je spojení dvou a více piconetů. Rozdílem mezi piconetem a scatternetem je to, že ve scatternetu může být podřízená jednotka z první sítě zároveň nadřazenou nebo podřízenou jednotkou druhé sítě (viz obr. 3.2b).

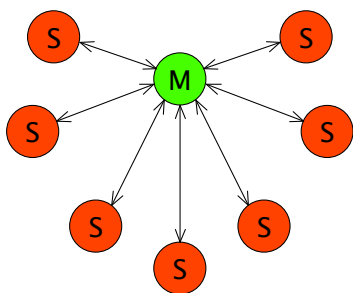


(a) Point to point

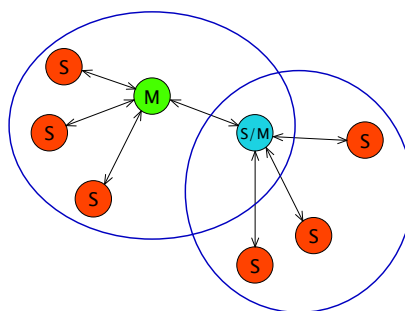


(b) Point to multipoint

Obr. 3.1: Typy struktur v topologii ad-hoc.



(a) Piconet



(b) Scatternet

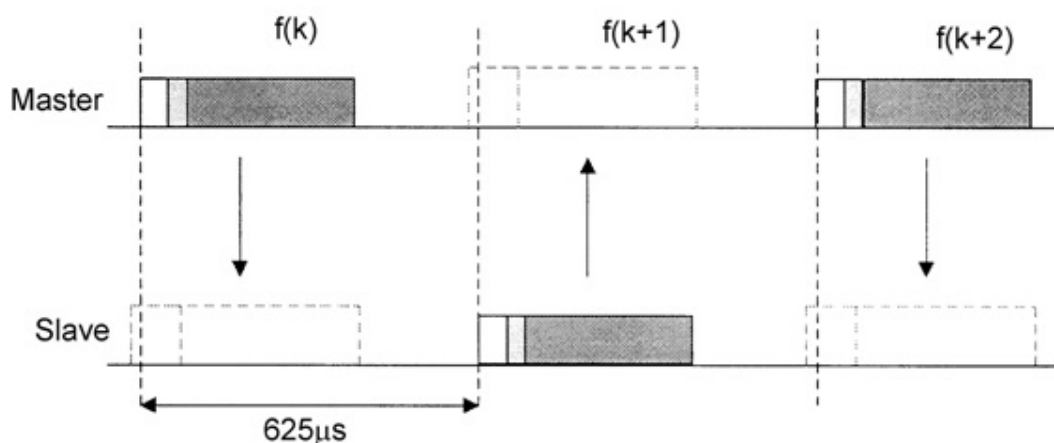
Obr. 3.2: Typy sítě v systému Bluetooth.

3.5 Modulace a zpracování signálu

Bluetooth používá modulaci FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Je to systém se rozprostřeným spektrem, kde dochází ke skákání nosné vlny. Tato modulace používá v Evropě a USA celkem 79 nosných kmitočtů se šířkou 1 MHz, po kterých přeskakuje nosná vlna modulovaná pomocí GFSK. Za jednu sekundu dojde k 1600 přeskokům. Z toho vyplývá, že doba vysílání na jedné nosné je [16]:

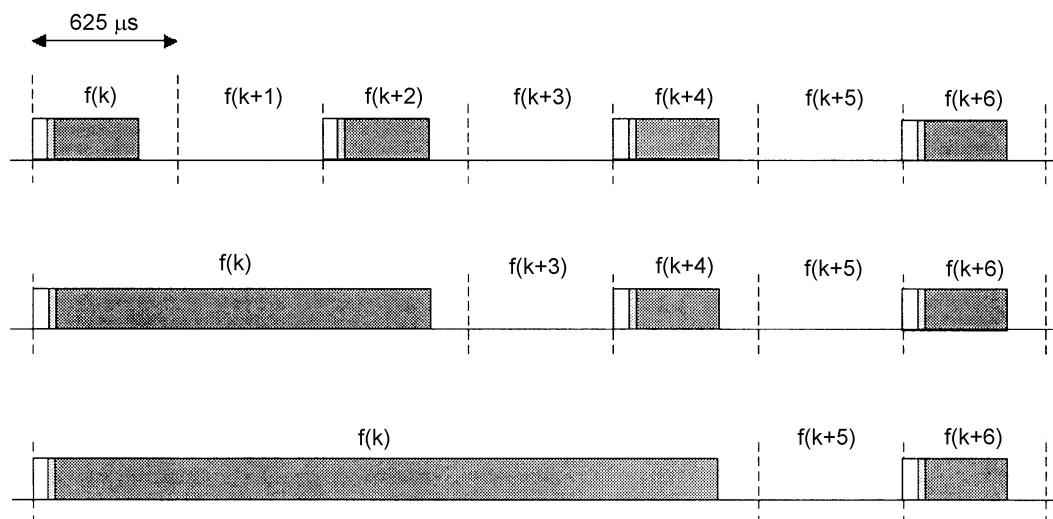
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1600} = 625 \mu s, \quad (3.1)$$

Jednotlivé rádiové kanály jsou rozděleny na časové úseky délky $625 \mu s$. Při komunikaci mezi terminály (*Master* a *Slave*) se využívá časový duplex TDD (Time Division Duplex). Jednotka *Master* vysílá pakety pouze v sudém časovém úseku (timeslot) a jednotka *Slave* vysílá pakety pouze v lichém časovém úseku. Příklad této komunikace můžete vidět na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Komunikace mezi jednotkami Master a Slave (převzato z [15]).

Přenášený paket se může skládat z jednoho, ze tří nebo z pěti timeslotů, viz obr. 3.4.



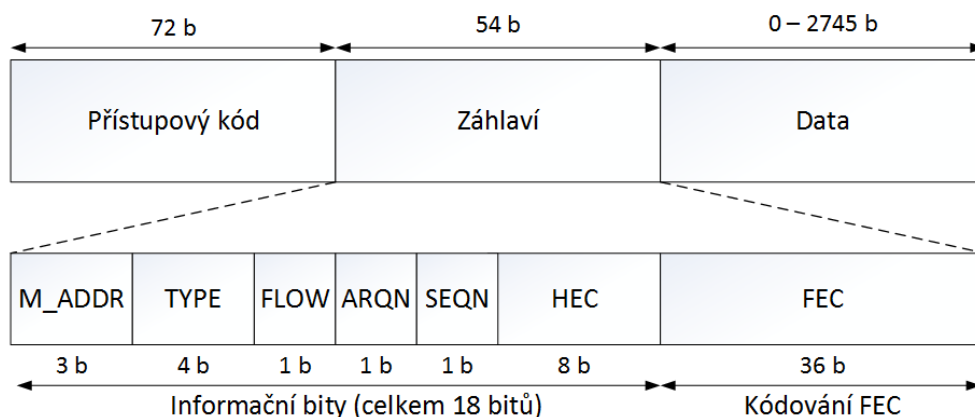
Obr. 3.4: Pakety skládané z různých počtů timeslotu (převzato z [15]).

Každý paket se skládá z přístupového kódu, záhlaví a uživatelských dat.

Přístupový kód – je unikátní a má 72 bitů. Bývá určen řídicí jednotkou. Slouží k synchronizaci a autorizovanému přístupu. Je to kód, který má pseudonáhodné vlastnosti.

Záhlaví – skládá se z 54 bitů. Obsahuje 18 informačních bitů, tyto bity jsou posléze rozšířeny na konečných 54 bitů pomocí kódování FEC (Forward Error Correction). V záhlaví můžeme najít adresu řízení přístupu na médium (M_ADDR), informace o typu paketu (TYPE), bit řídicí tok (FLOW), bity pro ochranu (ARQN, SEQN) a bity pro kontrolu chyb (HEC). Informace obsažené v záhlaví můžete vidět na obr. 3.5.

Uživatelská data – mohou mít délku v rozmezí 0 až 2745 bitů.



Obr. 3.5: Paket přenášený v systému Bluetooth (inspirováno z [16]).

3.6 Bluetooth Low Energy - BLE

Hlavním rozdílem nebo zlepšením oproti klasickému Bluetooth je fakt, že má mnohem nižší spotřebu energie. Bluetooth Low Energy pracuje ve stejném ISM pásmu 2,4 až 2,4835 GHz jako klasický Bluetooth.

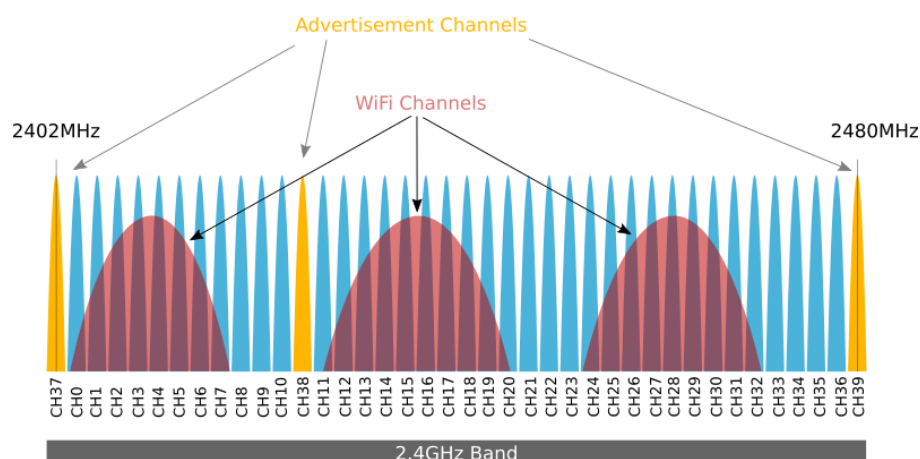
Tab. 3.3: Dosah BLE podle výkonu (převzato z [21]).

Třída	Maximální povolený výkon		Dosah m
	mW	dBm	
1	10	10	cca 40

Používá stejnou topologii sítě jako klasický Bluetooth. Topologie sítě je podrobně popsána v sekci 3.4.

Bluetooth Low Energy používá modulaci DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Je to systém s přímo rozprostřeným spektrem. Tato modulace funguje tak, že se k jednotlivým přenášeným bitům přidá pseudonáhodný kód. Tím daný přenos získá větší odolnost vůči odposlechům. Modulace DSSS je více odolný vůči rušení. Pro více informací k této modulaci viz [23].

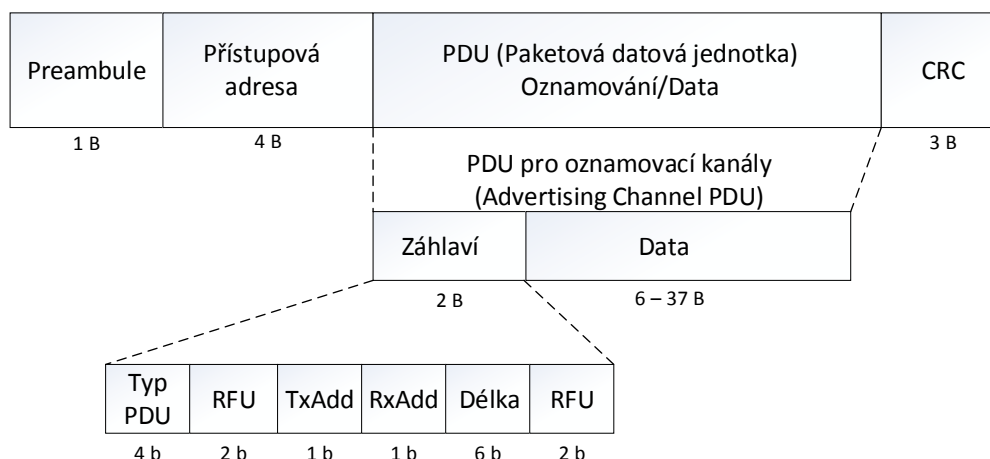
Bluetooth Low Energy narozdíl od klasického Bluetooth používá celkem 40 nosných kmitočtů se šířkou 2 MHz. BLE používá 3 kanály pro oznamování (advertising channels) a zbylých 37 kanálů používá pro přenos dat. Viz obr. 3.6. Klasický Bluetooth používá 32 kanálů pro oznamování.



Obr. 3.6: Bluetooth Low Energy kanály ve srovnání s Wi-Fi kanály (převzato z [24]).

3.6.1 BLE Oznamovací paket (Advertising packet)

V této sekci bude popsán oznamovací paket (advertising packet) technologie Bluetooth Low Energy. Specifikace uvádí pouze jeden formát BLE packetu. A tento formát má dva typy PDU (Packet Data Unit), a to pro oznamování (advertising) a data. Zde je popsán pouze PDU pro oznamování, viz níže přiložený obr. 3.7.



Obr. 3.7: BLE oznamovací paket (inspirováno z [24]).

Popis:

Preamble - pro oznamovací (advertising) pakety je tato hodnota 10101010b.

Přístupová adresa - pro oznamovací pakety je tato hodnota vždy 0x8E89BED6.

Záhlaví - má délku 2 B. A skládá se z částí:

- Typ PDU - pro více informací viz [24] a [25].
- RFU - rezervováno pro budoucí využití,
- TxAdd - vysílací adresa,
- RxAdd - přijímací adresa,
- Délka - délka dat,
- RFU - rezervováno pro budoucí využití.

Data - mohou mít délku 6 až 37 B.

Obsahují např. hodnotu RSSI, MAC adresu zařízení, název zařízení atd.

CRC - cyklický redundantní součet.

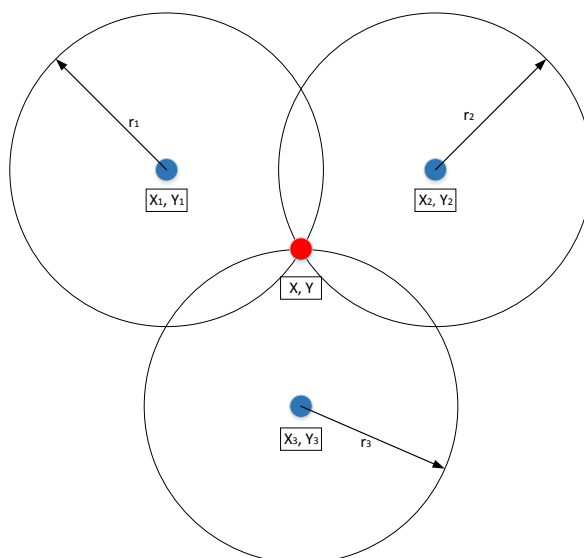
4 TRILATERACE

Trilaterace je metoda pro nalezení souřadnice neznámého objektu. Princip této metody spočívá ve vypočítání (odhadnutí) souřadnice neznámého objektu díky znalosti souřadnic tří nejbližších bodů (senzorů) a vzdálenosti těchto tří bodů k neznámému objektu podle rovnic (4.1).

$$\begin{aligned}(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= r_1^2 \\(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 &= r_2^2 \\(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 &= r_3^2\end{aligned}\tag{4.1}$$

kde x_n, y_n jsou souřadnice tří nejbližších bodů (senzorů), x, y jsou souřadnice neznámého objektu a r_n je vzdálenost od známého bodu k neznámému objektu.

Na níže uvedeném obr. 4.1 je znázorněn princip této metody.



Obr. 4.1: Grafické znázornění principu metody trilaterace.

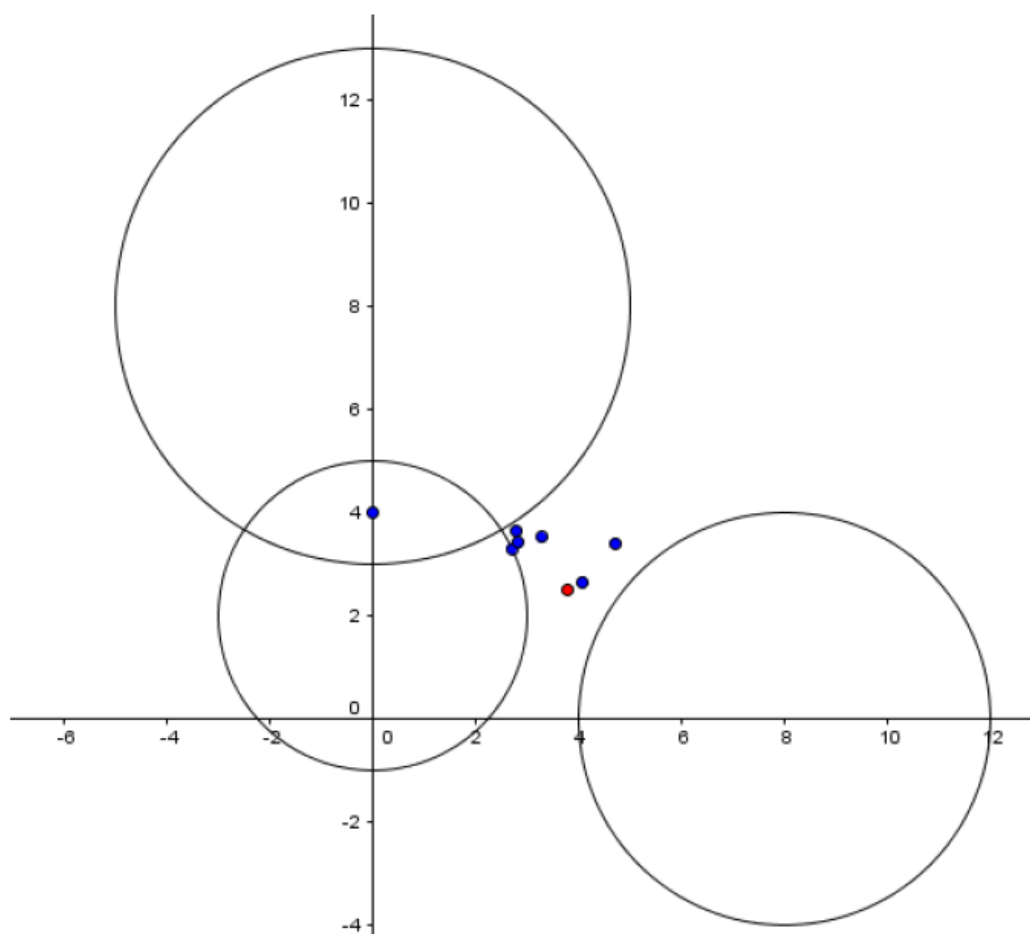
Tato metoda je velice citlivá na stanovení vzdáleností, viz sekce 4.1.

4.1 Případy, které mohou nastat nepřesným stanovením vzdáleností

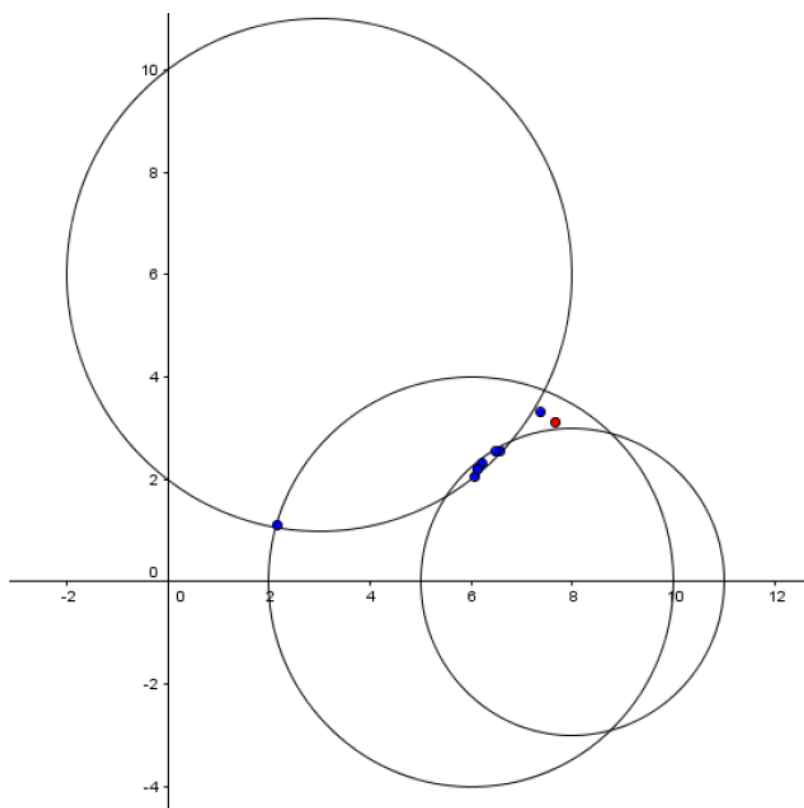
V této sekci jsou graficky znázorněny případy, které mohou nastat v důsledku nepřesného stanovení vzdáleností.

Legenda:

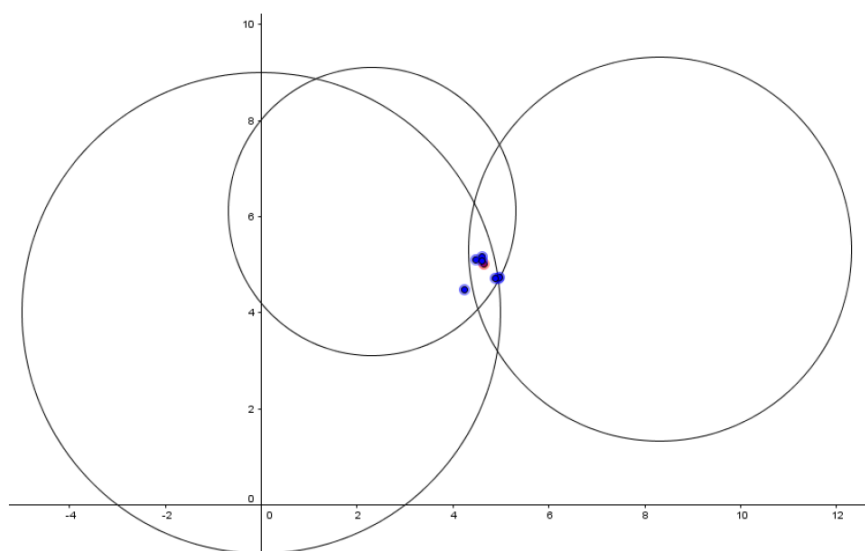
- červený bod – reálná poloha objektu,
- modrý bod – odhadovaná poloha objektu.



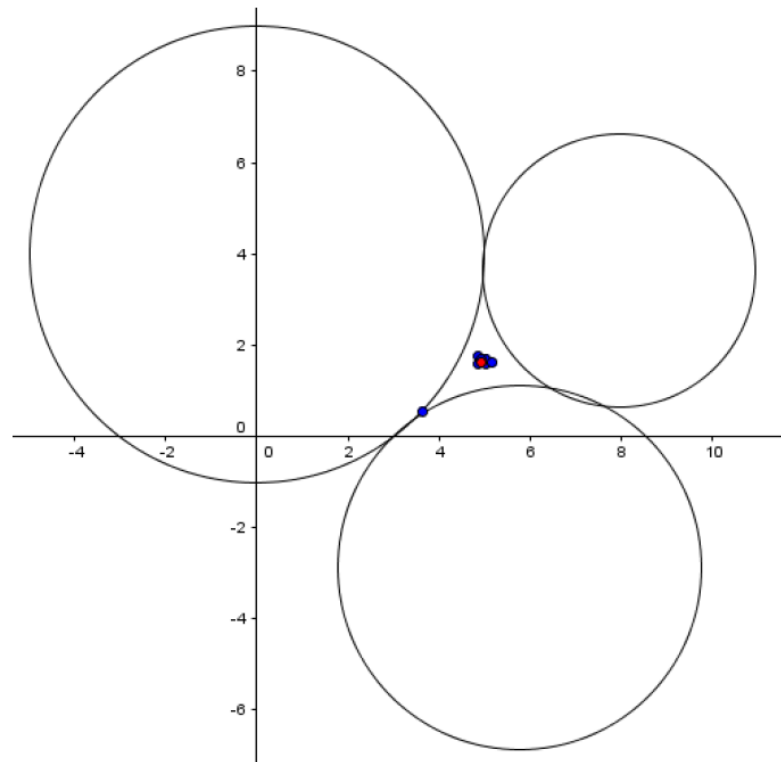
(a)



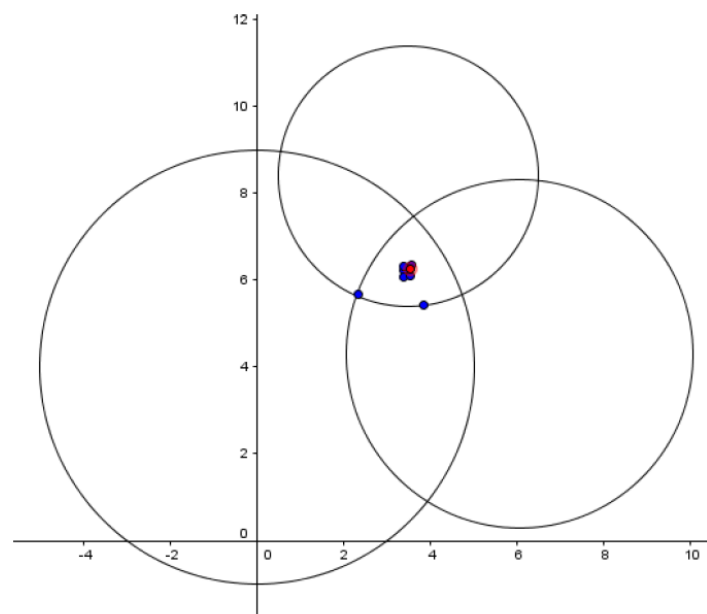
(b)



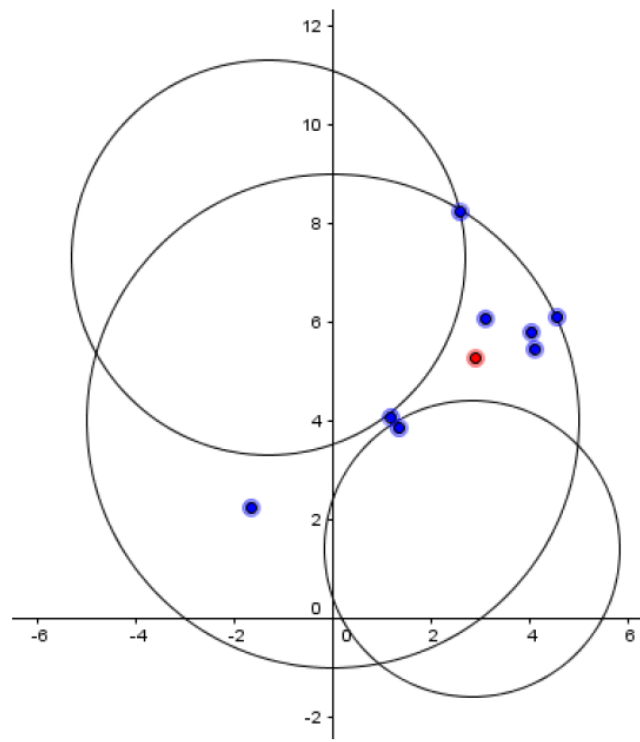
(c)



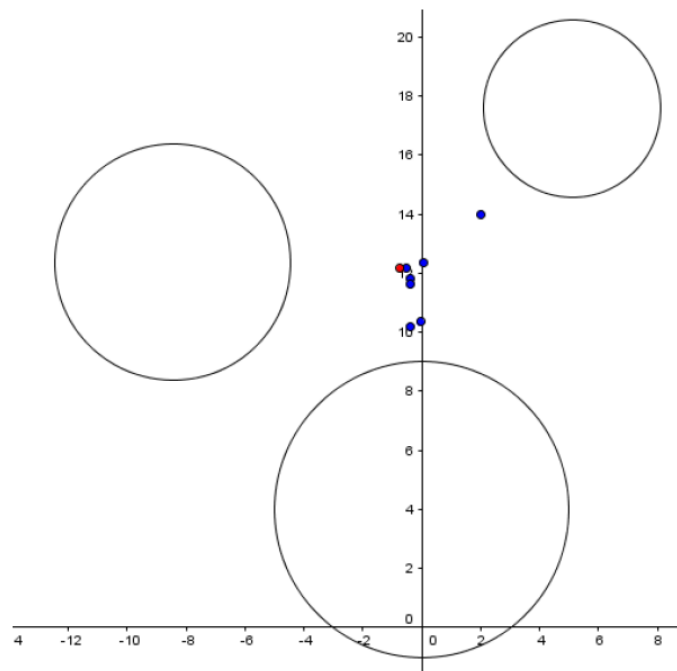
(d)



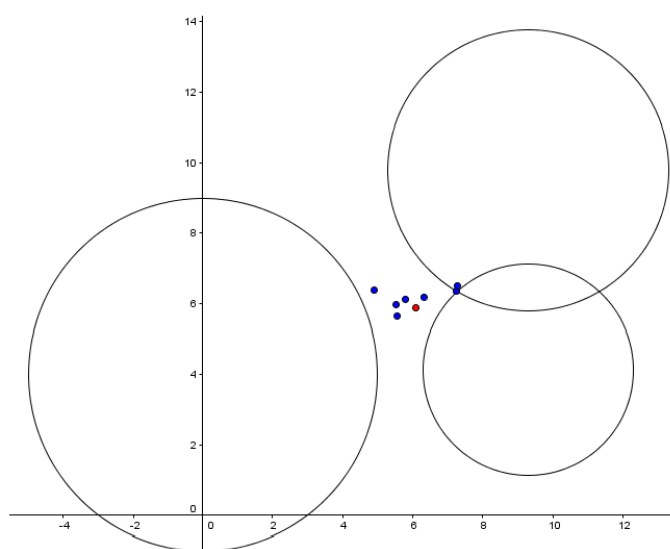
(e)



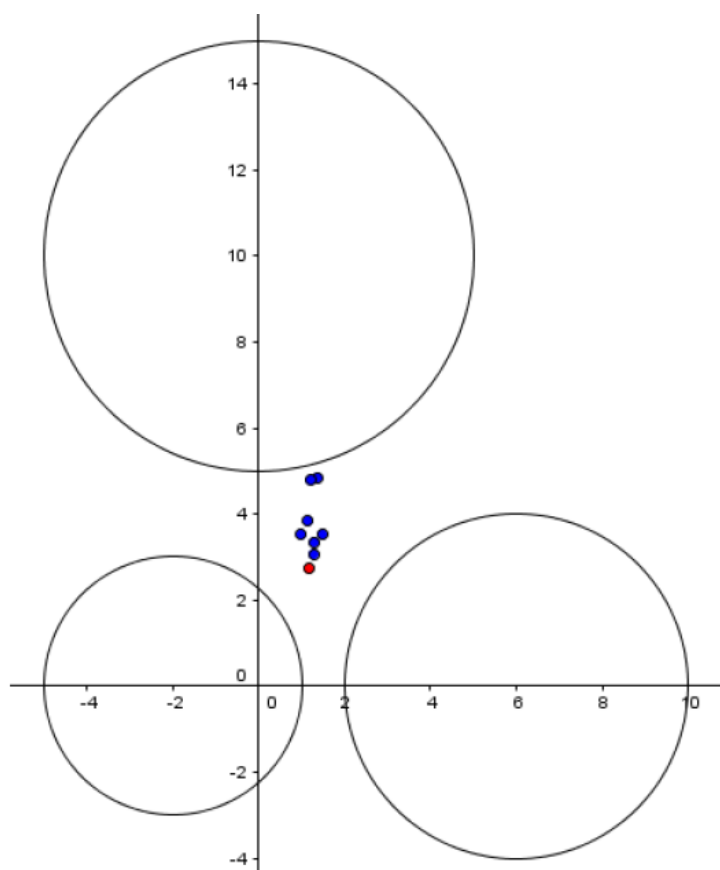
(f)



(g)



(h)



(i)

Obr. 4.-2: Důsledky nepřesného stanovení vzdálenosti (převzato z [27]).

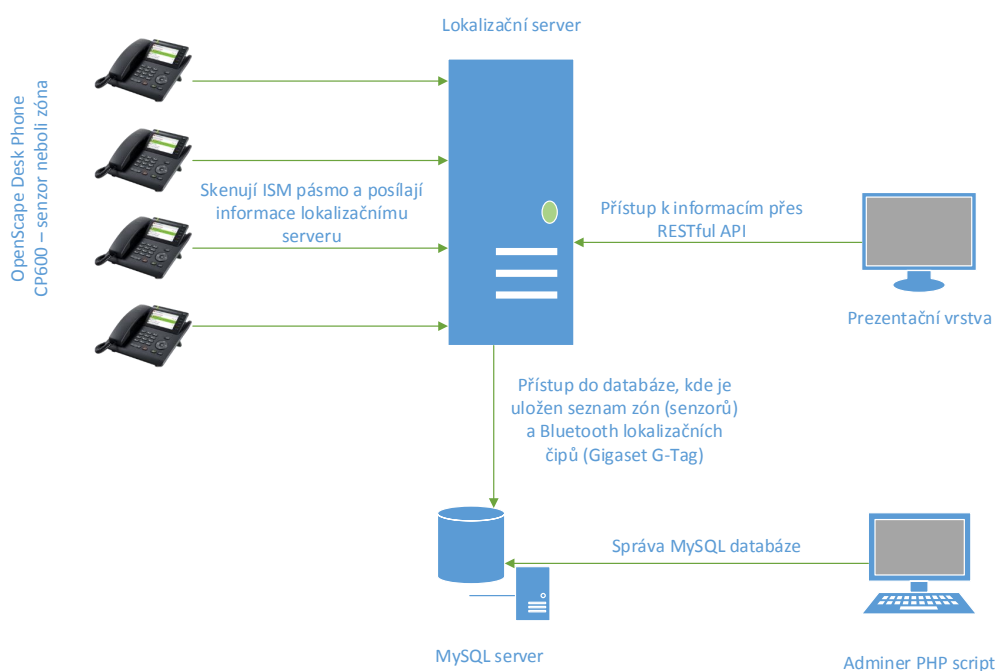
5 LOKALIZACE UVNITŘ BUDOV POMOCÍ BLUETOOTH LOW ENERGY

V této sekci bude popsána lokalizace objektů nebo osob uvnitř budovy (tzv. indoor lokalizace) využívající technologii BLE (Bluetooth Low Energy).

Pro vytvoření aplikace pro lokalizaci uvnitř budov byl použit objektově orientovaný skriptovací jazyk JavaScript, programovací jazyk Perl a značkovací jazyk HTML.

5.1 Infrastruktura testované lokalizační sítě

Lokalizační infrastrukturu, která byla testována ve firmě IXPERTA s.r.o, můžete vidět níže na obr. 5.1. Testování probíhalo za běžného provozu s veškerým rušením od ostatních zařízení.



Obr. 5.1: Infrastruktura lokalizační sítě.

Jak bylo vidět na obr. 5.1, jako senzor používáme telefony OpenScape Desk Phone CP600. Jsou to telefony, které jsou určeny pro architekturu SIP. Senzory skenují ISM pásmo a posílají informace o nejbližších BLE zařízeních (klíčenky Gigaset G-Tag) lokalizačnímu serveru pomocí IP protokolu.

Většina zaměstnanců podílejících se na testování dostala Bluetooth lokalizační čip (neboli klíčenku Gigaset G-Tag), pomocí kterého jsme schopni lokalizovat jednotlivé osoby či objekty. Tyto klíčenky můžete vidět na obr. 5.2.

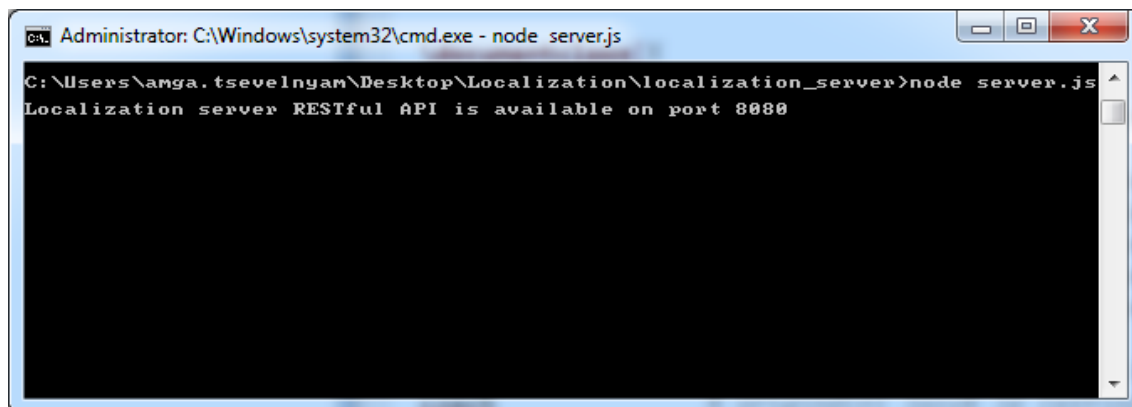


Obr. 5.2: Gigaset G-Tag - Bluetooth lokalizační čip.

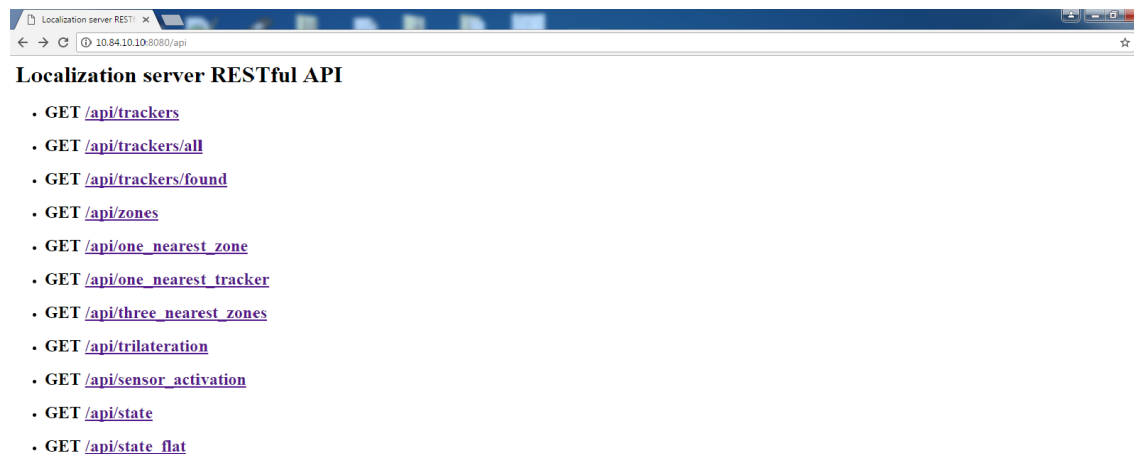
Tyto lokalizační čipy neustále vysílají do svého okolí oznamovací pakety (advertisement packets), které obsahují konkrétní MAC adresu a RSSI hodnotu. Právě tyto informace snímá senzor a posílá je pak lokalizačnímu serveru.

5.2 Lokalizační server

Lokalizační server sbírá data o BLE zařízeních, a poté s využitím dostupných lokalizačních metod vypočítá (odhadne) polohu osoby nebo hledaného objektu. Výsledky lokalizace jsou potom dostupné přes RESTful API (Fielding's Representational State Transfer Application Programming Interface), viz obr. 5.4, aby mohly být graficky reprezentovány.



Obr. 5.3: Ukázka spuštění serveru přes příkazový řádek.



Obr. 5.4: Přehled dostupných REST zdrojů lokalizačního serveru.

Dostupné lokalizační metody jsou popsány níže, viz kapitola 5.4 a 5.5.

5.3 Realizace měření

Měřil jsem závislost přesnosti dvou lokalizačních metod na hustotě lokalizační sítě. Abych mohl změřit tyto závislosti, musel jsem připravit speciální prostředí pro tato měření. Jelikož dosavadní použité senzory (telefony OpenScape Desk Phone CP600) jsem nemohl rozmísťovat dle svých představ, musel jsem jako senzor použít lokalizační čipy Gigaset G-Tag. To znamená, že nyní senzory neskenují ISM pásmo, ale neznámý objekt (lokalizační agent) skenuje ISM pásmo a informace posílá lokalizačnímu serveru.

Z toho vyplývá, že jsem v podstatě princip infrastruktury, která byla popsána výše, otočil. Při měření lokalizační agent skenoval ISM pásmo a odesílal data lokalizačnímu serveru, který pak pomocí dostupných lokalizačních metod určil polohu objektu. Lokalizační čipy (Gigaset G-Tag) jsem považoval za senzory, které jsem mohl rozmísťovat dle svých potřeb bez jakéhokoliv omezení a tak měnit hustotu lokalizační sítě.

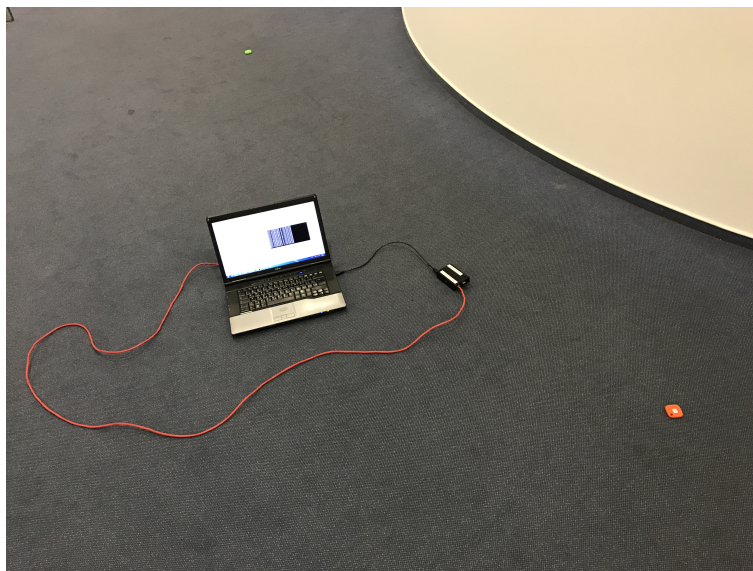
Jako lokalizační agent, který snímá ISM pásmo a odesílá informace lokalizačnímu serveru, jsem použil Raspberry Pi s operačním systémem Debian a se Bluetooth donglem. Tohoto lokalizačního agenta můžete vidět na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Lokalizační agent.

Při původní infrastruktuře, viz sekce 5.1, ISM pásmo skenovaly senzory (telefony OpenScape Desk Phone CP600) a data posílaly lokalizačnímu serveru. V tomto případě ISM pásmo skenoval lokalizační agent (neznámý objekt) a data posílal lokalizačnímu serveru.

Měřil jsem závislost přesnosti lokalizace na hustotě lokalizační sítě tak, že jsem měnil vzdálenost mezi senzory neboli lokalizačními čipy. Svůj notebook jsem používal jako lokalizační server. Na obr. 5.6 vidíte lokalizační server a lokalizačního agenta přímo při měření. A na obr. 5.7 vidíte rozmístění senzorů, kdy vzdálenost mezi nimi byla 1 m.



Obr. 5.6: Lokalizační server a lokalizační agent při měření.

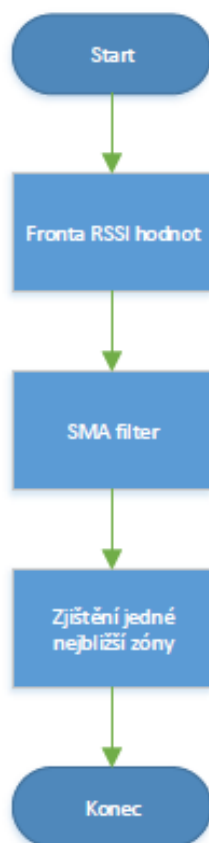


Obr. 5.7: Rozmístění senzorů kdy vzdálenost mezi senzory byla 1 m.

5.4 Metoda Jedna nejbližší zóna

Tato metoda je jedna z metod, které jsou založené na blízkosti. Viz sekce 1.1.1.

5.4.1 Princip lokalizace



Obr. 5.8: Vývojový diagram metody Jedna nejbližší zóna.

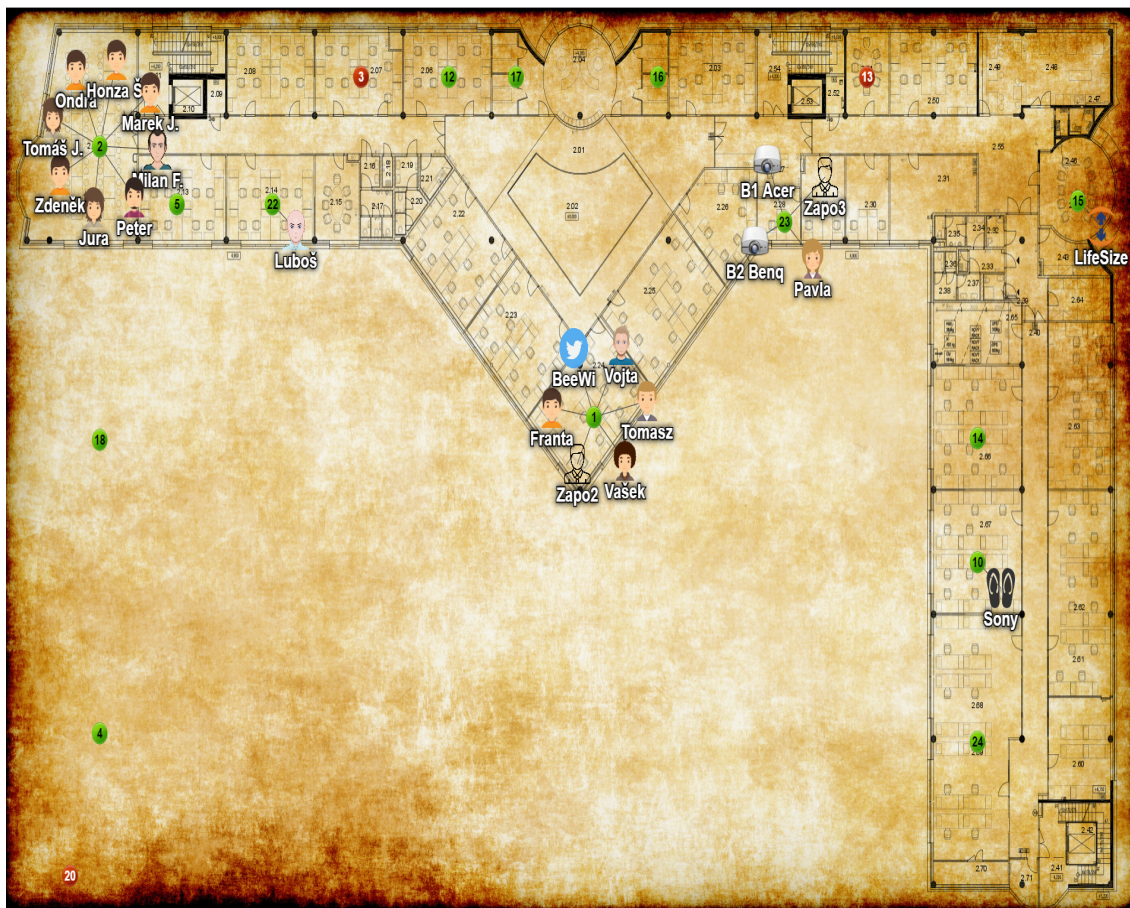
Průběh:

1. Ke každému Bluetooth lokalizačnímu čipu (Gigaset G-Tagu neboli hledanému objektu) dostaneme seznam zón, které jsou v dosahu daného lokalizačního čipu. Každá zóna má také frontu naměřených RSSI hodnot.
2. Fronta je pak zprůměrována pomocí SMA (Simple Moving Average) filtru. Po tomto úkonu dostaneme ke jedné zóně vždycky jednu hodnotu RSSI, se kterou dále pracujeme.
3. Potom se najde pomocí funkce **reduce** zóna (senzor) s největší hodnotou RSSI. Tato zóna (senzor) je poté brána jako nejbližší k danému Gigaset G-Tagu.

5.4.2 Ukázka lokalizace

Ve firmě máme navíc vytvořenou prezentační vrstvu, která pomocí REST zdrojů od lokalizačního serveru graficky vizualizuje výsledek lokalizace.

Na níže uvedeném obr. 5.9 můžete vidět prezentační vrstvu, jak graficky vizualizuje tuto metodu.



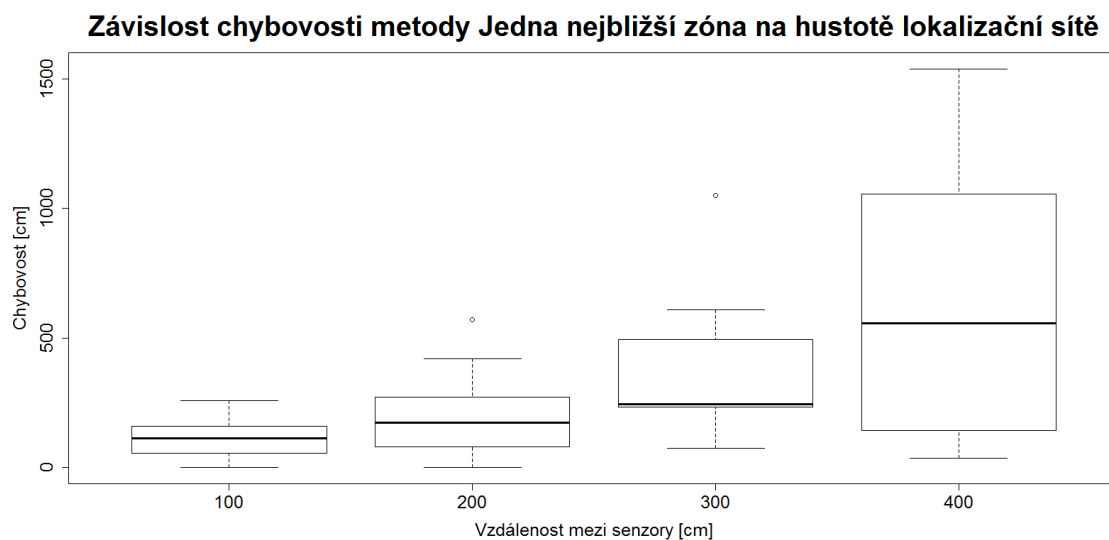
Obr. 5.9: Ukázka lokalizace pomocí metody Jedna nejbližší zóna.

Legenda:

- zelené body - aktivní senzory,
- červené body - neaktivní senzory
- osobám a objektům byly přiřazeny souřadnice senzorů.

5.4.3 Výsledky měření

Měřením jsem zjistil, že přesnost této metody klesá se snižující se hustotou lokalizační sítě neboli chybovost této metody roste se snižující se hustotou lokalizační sítě. Viz obr. 5.10.



Obr. 5.10: Závislost chybovosti metody Jedna nejbližší zóna na hustotě lokalizační sítě.

V níže uvedené tabulce 5.1 jsou přesné hodnoty kvantilů chybovosti této metody.

Tab. 5.1: Kvantily chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při různých hustotách lokalizační sítě

Kvantily	Vzdálenost mezi senzory [cm]			
	100	200	300	400
0%	2	1	74	36
25%	55,75	80,50	234,75	165
50%	114,50	173	244,50	556
75%	155,75	267,50	440	1017,25
100%	260	571	1050	1538

Hodnoty z měření, ze kterých následně byly vypočítány tyto kvantily, můžete najít v příloze. Viz příloha A.1.

5.5 Metoda Trilaterace

Tato metoda je jedna z metod, které jsou založené na rozsahu. Viz sekce 1.1.1.

5.5.1 Princip lokalizace



Obr. 5.11: Vývojový diagram metody Trilaterace.

Průběh:

1. Ke každému Bluetooth lokalizačnímu čipu (Gigaset G-Tagu neboli hledanému objektu) dostaneme seznam zón, které jsou v dosahu daného lokalizačního čipu. Každá zóna má také frontu naměřených RSSI hodnot.
2. Fronta je pak zprůměrována pomocí SMA filtru. Po tomto úkonu dostaneme ke jedné zóně vždycky jednu hodnotu RSSI, se kterou dále pracujeme.
3. Potom se najdou pomocí funkce **sort** tři nejbližší zóny (senzory).
4. Nakonec se pomocí trilaterace určí poloha objektu či osoby.

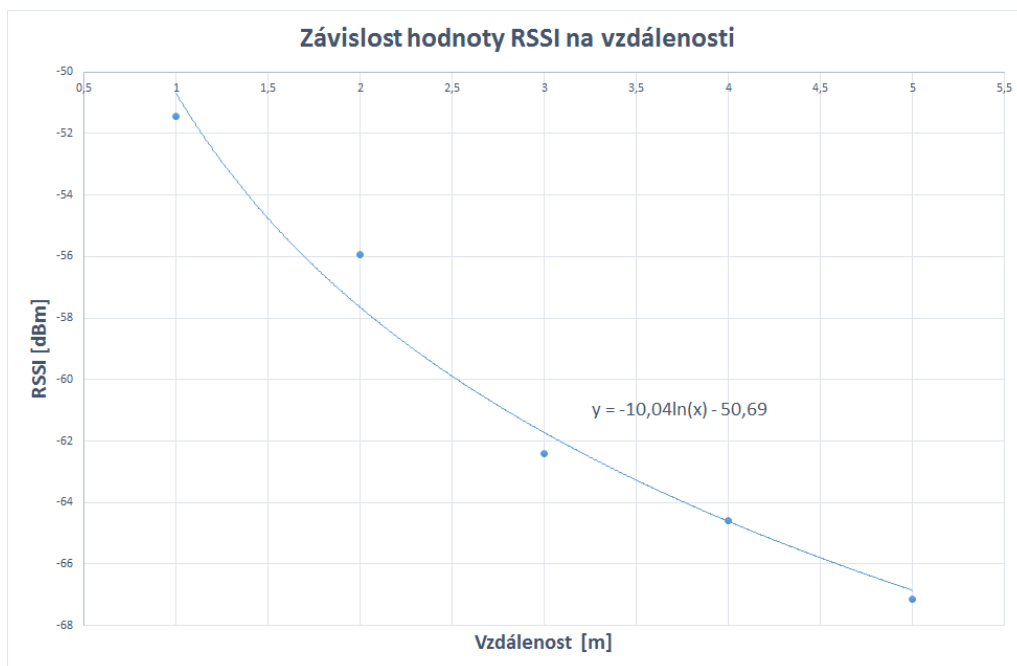
Pro více informací ohledně trilaterace viz [2], 4, [26] a [27].

5.5.2 Závislost mezi hodnotou RSSI a vzdáleností

Zjistil jsem závislost hodnoty RSSI na vzdálenosti v budově firmy IXPERTA s.r.o. Z měření vyplývá, že v budově firmy IXPERTA s.r.o hodnota RSSI přibližně logaritmicky klesá se vzrůstající se vzdáleností, viz obr. 5.12.

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty RSSI při různých vzdálenostech.

Vzdálenost [m]	1	2	3	4	5
RSSI [dBm]	-51,45	-55,94	-62,41	-64,60	-67,14



Obr. 5.12: Závislost hodnoty RSSI na vzdálenosti.

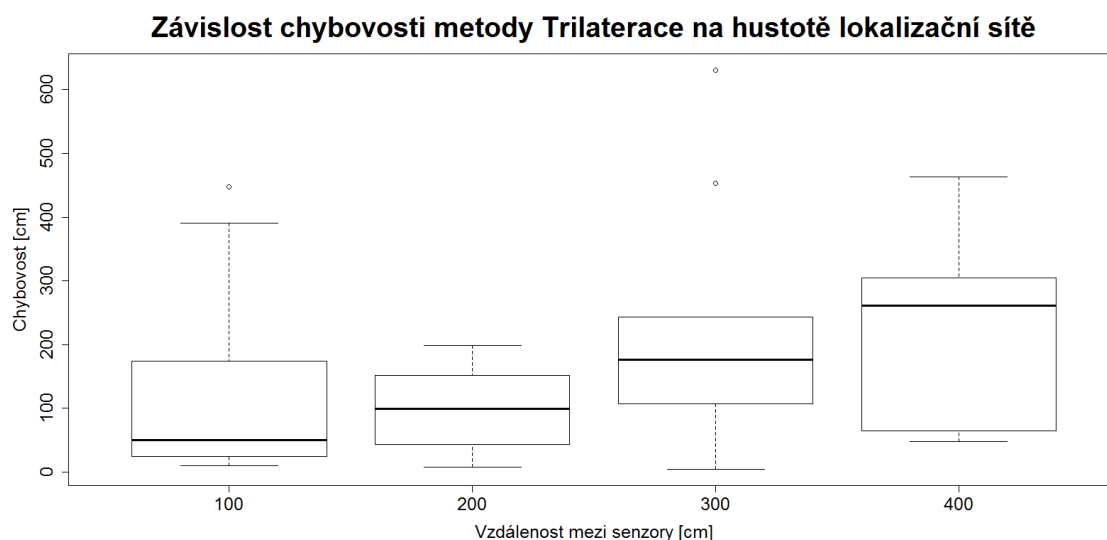
Na základě měření a pomocí programu Microsoft Excel jsem zjistil převodní vztah mezi hodnotou RSSI a vzdáleností:

$$x = e^{-0.09960159 \times y - 5.04880478}, \quad (5.1)$$

kde x je vzdálenost a y je hodnota RSSI. Tento převodní vztah platí pro budovu firmy IXPERTA s.r.o a je využita při zjištění vzdáleností zón, které jsou následně používány při výpočtu trilaterace.

5.5.3 Výsledky měření

Měřením jsem zjistil, že přesnost této metody klesá se snižující se hustotou lokalizační sítě neboli chybovost této metody roste se snižující se hustotou lokalizační sítě. Nicméně ve srovnání s předešlou metodou vykazuje tato metoda menší chybovost. Viz obr. 5.13.



Obr. 5.13: Závislost chybovosti metody Trilaterace na hustotě lokalizační sítě.

V níže uvedené tabulce 5.3 jsou přesné hodnoty kvantilů chybovosti této metody.

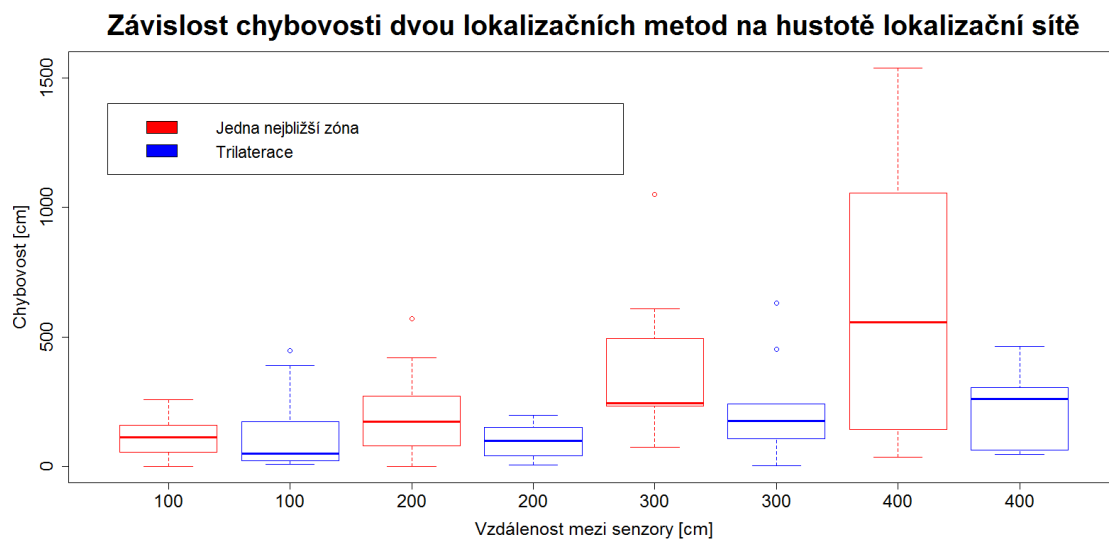
Tab. 5.3: Kvantily chybovosti metody Trilaterace při různých hustotách lokalizační sítě

Kvantily	Vzdálenost mezi senzory [cm]			
	100	200	300	400
0%	10	7	4	48
25%	25,25	47,25	119,25	72,25
50%	49,50	99	176	260,50
75%	171,50	151,25	236,25	299,50
100%	448	199	631	463

Hodnoty z měření, ze kterých následně byly vypočítány tyto kvantily, můžete najít v příloze. Viz příloha A.2.

5.6 Srovnání výsledků měření

Z měření vyplynulo, že metoda Trilaterace je přesnější než metoda Jedna nejbližší zóna, viz obr. 5.14.



Obr. 5.14: Závislost chybovosti dvou lokalizačních metod na hustotě lokalizační sítě.

ZÁVĚR

Během své diplomové práce jsem si prostudoval teorii k lokalizaci a ke Bluetooth Low Energy. Pro účely indoor lokalizace byl vytvořen server s lokalizační metodou Jedna nejbližší zóna, která spadá mezi metody založených na blízkosti. Změřil jsem přesnost této metody, kterou nyní využíváme u nás ve firmě IXPERTA s.r.o, v závislosti na hustotě lokalizační sítě.

Zjistil jsem, že při zvýšení vzdálenosti mezi senzory z jednoho metru na dva metry se chybovost zvýšila cca 1,5krát. Když jsem zvýšil tuto vzdálenost ze dvou metrů na tři metry, tak chybovost se zvýšila cca 1,4krát. Nakonec když jsem tuto vzdálenost zvýšil ze tří metrů na čtyři metry, tak chybovost se zvýšila dokonce o dvojnásobek. Viz obr. 5.10 a tab. 5.1.

Pokud teoreticky nejbližší senzor je vždy nejsilnější, tak chyb může být maximálně polovina vzdálenosti mezi senzory. Z výsledků měření ale plyne, že celkem často senzor s nejsilnějším signálem nemusí být nejbližší. Viz obr. 5.10, tab. 5.1 a hodnoty získané měřením A.1.

Poté jsem implementoval do lokalizačního serveru další lokalizační metodu *Trilaterace*, která spadá mezi metody založených na rozsahu. A také jsem změřil přesnost této metody v závislosti na hustotě lokalizační sítě.

Z měření vyplývá, že přesnost této metody také klesá se snižující se hustotou lokalizační sítě, ale ve srovnání s předešlou metodou vykazuje tato metoda menší chybovost. Viz obr. 5.13, tab. 5.3 a hodnoty získané měřením A.2. Z provedených měření tedy vyplývá, že tato metoda vykazuje větší přesnost lokalizace při menší hustotě lokalizační sítě než předešlá metoda.

Měřením jsem si ověřil předpoklad, že metody založené na rozsahu jsou přesnější než metody založené na blízkosti, viz obr. 5.14.

V budoucnu by se tato práce mohla rozšířit o další lokalizační metody, např.: *Ecolocation*, *Log-Normal Shadowing Model*, *Fingerprinting* atd.

Velmi zajímavé by bylo vytvoření malého přenosného BLE zařízení, které by se samo dokázalo časově zasynchronizovat s lokalizačním serverem. Potom by se dala aplikovat metoda založená na měření doby šíření signálu, např. metoda *TOA (Time of arrival)*.

LITERATURA

- [1] SCHEERENS, D. *Practical indoor localization using Bluetooth*, University of Twente, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2012. 99 s.
- [2] *Wikipedia - Trilateration* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>.
- [3] *Wikipedia - Radar* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>.
- [4] *Wikipedia - Sonar* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sonar>.
- [5] *Wikipedia - Global Positioning System* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System.
- [6] TSEVELNYAM, A. *Měření vlivu provozu v ISM pásmech na kvalitu Bluetooth přenosů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Sysel, Ph.D..
- [7] MORROW, R. *Bluetooth Operation and Use*, 2002, 567 s. ISBN 0-07-138779-X
- [8] *Bluetooth Core Specification 4.0. Bluetooth Special Interest Group* [online]. [cit. 18.11.2014]. Dostupné z URL: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737. [14.10.2014].
- [9] *Wikipedia - ISM band* [online]. [cit. 2014-11-18]. Dostupné z URL: http://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band.
- [10] *Wikipedia - International Telecommunication Union region* [online]. [cit. 18.11.2014]. Dostupné z URL: http://en.wikipedia.org/wiki/International_Telecommunication_Union_region.
- [11] *Wikipedia - ITU Radio Regulations* [online]. [cit. 18.11.2014]. Dostupné z URL: http://en.wikipedia.org/wiki/ITU_Radio_Regulations.
- [12] *Wikipedia - Bluetooth* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>.

- [13] *Bluetooth SIG - Specifications* [online]. [cit. 16.12.2014]. Dostupné z URL: <https://www.bluetooth.org/en-us/specification/adopted-specifications>.
- [14] HANUS, S. *Nové technologie mobilních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, Brno, 2013, 100 s. ISBN 978-80-214-4824-7
- [15] HANUS, S. *BEZDRÁTOVÉ A MOBILNÍ KOMUNIKACE*, Brno, 2003, 135 s. ISBN 80-214-1833-8
- [16] ŽALUD, V. *Moderní radioelektronika*, Praha, 2000, 656 s. ISBN 978-80-7300-292-3
- [17] GUPTA, N. *Inside Bluetooth Low Energy*, 2013. ISBN-13: 978-1-60807-579-9
- [18] *BlueZ - Official Linux Bluetooth protocol stack* [online]. [cit. 6.11.2014]. Dostupné z URL: <http://www.bluez.org/>.
- [19] HUANG, A.; RUDOLPH, L. *Bluetooth Essentials for Programmers*, 2007, 198 s. ISBN-13 978-0-511-35583-7
- [20] KAMMER, D.; McNUTT, G.; SENESE, B.; BRAY, J. *Bluetooth Application Developer's Guide*, Syngress, 2002. ISBN 1-928994-42-3
- [21] *Wikipedia - Bluetooth low energy* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_low_energy.
- [22] Nordic Semiconductor *Inside Bluetooth low energy technology*, 2011, 6 s.
- [23] *Wikipedia - Direct Sequence Spread Spectrum* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct-sequence_spread_spectrum.
- [24] *Argenox - A BLE Advertising Primer* [online]. [cit. 4.12.2016]. Dostupné z URL: <http://www.argenox.com/a-ble-advertising-primer/>.
- [25] *John Abraham - Understanding Bluetooth Advertising Packets* [online]. [cit. 4.6.2014]. Dostupné z URL: <http://j2abro.blogspot.cz/2014/06/understanding-bluetooth-advertising.html>.
- [26] FRANTIŠEK, Milan *Určování polohy zařízení v bezdrátovém systému*, diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a

- komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 64 s. Vedoucí práce byl Ing. Miroslav Botta.
- [27] CELENG, M. *Systém lokalizace uvnitř budov*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Levek.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

RSS	Received Signal Strength – inzenzita přijímaného signálu
BER	Bit Error Rate – bitová chybovost
Radar	Radio Detection And Ranging – lokalizace pomocí rádiových vln
Sonar	Sound Navigation And Ranging – lokalizace pomocí ultrazvukových vln
GPS	Global Positioning System – lokalizace pomocí družic
GSM	Global System for Mobile Communications – Globální Systém pro Mobilní komunikaci
RFID	Radio-frequency identification – identifikace na rádiové frekvenci
ISM	Industrial, Scientific and Medical – průmyslové, vědecké a zdravotní
ITU	International Telecommunication Union – Mezinárodní telekomunikační unie
Wi-Fi	Wireless Fidelity – bezdrátové internetové připojení
PC	Personal Computer – osobní počítač
PDA	Personal Digital Assistant – osobní digitální pomocník např.: tablet, kindle atd.
RS-232	rozhraní pro sériovou komunikaci
WPAN	Wireless Personal Area Network – bezdrátová osobní síť
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum – typ modulace se rozprostřeným spektrem
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Instituce elektrického a elektronického inženýrství
LTE	Long-Term Evolution – vysokorychlostní mobilní internetové připojení
USA	United States of America – Spojené státy americké
f	kmitočet nosné
ad-hoc	typ topologie sítě

GFSK	Gaussian frequency-shift keying – Gaussovská frekvenční modulace
T	perioda nosné
TDD	Time Division Duplex – časový duplex
FEC	Forward Error Correction – dopředná korekce chyb
BLE	Bluetooth Low Energy – bluetooth s nízkou spotřebou energie
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum – modulace se přímým rozprostřeným spektrem
MAC	Media Access Control address – fyzická adresa
RSSI	Received Signal Strength Indicator – indikátor intenzity přijímaného signálu
SMA	Simple Moving Average – jednoduchý klouzavý průměr
PDU	Packet Data Unit – paketová datová jednotka
RESTful API	Fielding's Representational State Transfer Application Programming Interface – je architektura rozhraní jak jednoduše vytvořit, číst, editovat nebo smazat informace ze serveru pomocí jednoduchých HTTP volání.

SEZNAM PŘÍLOH

A	Hodnoty získané měřením	51
A.1	Změřené hodnoty přesnosti metody Jedna nejbližší zóna	51
A.2	Změřené hodnoty přesnosti metody Trilaterace	54
B	Obsah přiloženého CD	57

A HODNOTY ZÍSKANÉ MĚŘENÍM

Zde jsou přiloženy změřené hodnoty přesnosti lokalizačních metod při různé hustotě lokalizační sítě.

A.1 Změřené hodnoty přesnosti metody Jedna nejblížeší zóna

Tab. A.1: Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejblížeší zóna při vzdálenosti 100 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	270	100	170
2	344	400	56
3	179	300	121
4	152	400	248
5	372	500	128
6	231	200	31
7	240	500	260
8	398	400	2
9	292	400	108
10	365	500	135
11	252	300	48
12	190	400	210
13	163	400	237
14	272	400	128
15	351	200	151
16	197	300	103
17	208	300	92
18	173	200	27
19	298	200	98
20	255	200	55

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 100 cm mezi senzory činí **120,40 cm**.

Tab. A.2: Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 200 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	17	-200	217
2	262	0	262
3	571	0	571
4	438	400	38
5	289	600	311
6	180	600	420
7	477	400	77
8	201	200	1
9	512	400	112
10	10	200	190
11	99	400	301
12	284	0	284
13	216	0	216
14	319	200	119
15	305	400	95
16	279	200	79
17	401	400	1
18	213	400	187
19	559	400	159
20	119	200	81

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 200 cm mezi senzory činí **186,05** cm.

Tab. A.3: Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 300 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	49	300	251
2	663	900	237
3	1181	900	281
4	150	1200	1050
5	908	300	608
6	1138	900	238
7	666	900	234
8	824	600	224
9	1393	900	493
10	1126	1200	74

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 300 cm mezi senzory činí **369** cm.

Tab. A.4: Změřené hodnoty chybovosti metody Jedna nejbližší zóna při vzdálenosti 400 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	1104	400	704
2	792	1200	408
3	944	800	144
4	1304	400	904
5	1345	2400	1055
6	62	1600	1538
7	1329	1200	129
8	364	400	36
9	628	400	228
10	1627	400	1227

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 400 cm mezi senzory činí **637,30** cm.

A.2 Změřené hodnoty přesnosti metody Trilaterace

Tab. A.5: Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 100 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	522	550	28
2	450	296	154
3	896	886	10
4	490	453	37
5	626	457	169
6	677	650	27
7	312	760	448
8	483	873	390
9	395	150	245
10	715	536	179
11	142	158	16
12	885	875	10
13	234	350	116
14	431	418	13
15	554	600	46
16	706	466	240
17	809	756	53
18	581	558	23
19	322	258	64
20	75	101	26

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 100 cm mezi senzory činí **114,70 cm**.

Tab. A.6: Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 200 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	341	214	127
2	521	470	51
3	536	663	127
4	429	506	77
5	344	399	55
6	566	541	25
7	328	486	158
8	495	513	18
9	451	300	151
10	560	361	199
11	446	394	52
12	464	500	36
13	326	485	159
14	491	394	97
15	398	429	31
16	376	275	101
17	565	459	106
18	401	394	7
19	502	348	154
20	570	418	152

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 200 cm mezi senzory činí **94,15** cm.

Tab. A.7: Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 300 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	1292	1049	243
2	1264	1294	30
3	1225	1009	216
4	1439	986	453
5	1424	1317	107
6	1324	1328	4
7	1343	1157	186
8	1478	847	631
9	1216	1050	166
10	1393	1237	156

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 300 cm mezi senzory činí **219,20** cm.

Tab. A.8: Změřené hodnoty chybovosti metody Trilaterace při vzdálenosti 400 cm mezi senzory.

Číslo měření	Reálná poloha [cm]	Odhadovaná poloha [cm]	Chybovost [cm]
1	1789	1546	243
2	1887	1793	94
3	1902	1616	286
4	1951	1886	65
5	1852	2175	323
6	1609	1887	278
7	1622	1670	48
8	1661	1357	304
9	1750	1287	463
10	1668	1729	61

Měřením jsem zjistil, že průměrná chybovost při vzdálenosti 400 cm mezi senzory činí **216,50** cm.

B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- adresář **localization_server** - obsahuje všechny potřebné zdrojové kódy lokalizačního serveru,
- adresář **rss_i_scanner** - skener ISM pásma,
- xtseve00_mmst.pdf - text diplomové práce,
- README.txt.